«СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ОГРАНИЧЕНИЙ ПРЕДЕЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ БЕТОНА ПРИ РАСТЯЖЕНИИ И СЖАТИИ НА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТЬ И НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ»

Выполнил: Голубчиков Иван Александрович

Научный руководитель: Красовицкий Михаил Юрьевич
кандидат технических наук, доцент

Москва 2018 г.

Актуальность темы

Методика расчёта железобетонных конструкций по деформационной модели на нынешний день является весьма перспективной и приближенной к реальному поведению материала.

Но до сих пор в данной модели остаются неосвещенные и неизученные моменты. В частности, в технической литературе отсутствует информация о влиянии изменения ограничений деформационных диаграмм бетона на результаты расчетов.

Изучение этого вопроса позволяет восполнить пробел в исследовании деформационной модели и поэтому является актуальным направлением в развитии строительной науки и практики.

Цель и задачи исследования

Цель

: Провести сравнительный анализ влияния изменения ограничений деформационных диаграмм бетона на несущую способность и трещиностойкость железобетонных конструкций при растяжении и сжатии.

Задачи:

1. Провести анализ и обобщение сведений о различных типах диаграмм деформирования бетона и методиках расчета по ним.
2. Выбрать приемлемую методику для численных исследований.
3. На основе расчетной модели, разработать программный вычислительный комплекс, позволяющий рассчитывать железобетонные конструкции, как по методике деформационной модели с ограничениями из СП 63.13330.2012, так и с возможностью редактирования деформационных диаграмм и изменения их ограничений.
4. Провести проверку разработанных алгоритмов на основе сравнения с результатами ручного метода расчета.
5. Провести анализ полученных результатов и сделать выводы о влиянии увеличений ограничений диаграмм деформирования на результаты расчета несущей способности и трещиностойкости железобетонных конструкций при сжатии и растяжении.

На защиту выносятся:

- Разработанный программный расчетный комплекс для расчета железобетонных конструкций по деформационной модели на базе связки Microsoft Office Excel + Autodesk AutoCAD с использованием макросов на языке Visual Basic.
- Результаты численных исследований железобетонных конструкций по несущей способности и трещиностойкости при изменении ограничений деформационных диаграмм бетона.
- Сравнение полученных результатов и анализ влияния ограничений предельных деформаций бетона на несущую способность и трещиностойкость железобетонных элементов при растяжении и сжатии.

Суть расчёта по деформационной модели

Общие соображения

Расчет напряжённо деформированного состояния нормальных сечений по деформационной модели сводится к решению системы уравнений механики деформируемого твёрдого тела, включающей:

- *Статические условия* – уравнения равновесия внешних и внутренних сил в нормальном сечении;

$$N = \sum_i \sigma_{b,i} A_{b,i} + \sum_j \sigma_{s,j} A_{s,j},$$

$$M_x = \sum_i \sigma_{b,i} x_{b,i} A_{b,i} + \sum_j \sigma_{s,j} x_{s,j} A_{s,j},$$

$$M_y = \sum_i \sigma_{b,i} y_{b,i} A_{b,i} + \sum_j \sigma_{s,j} y_{s,j} A_{s,j},$$

- *Геометрические условия* – уравнения распределения деформаций бетона и арматуры по координатам сечения (уравнения совместности деформаций);

$$\varepsilon_{b,i} = \varepsilon_0 + \left(\frac{1}{r_x}\right) \cdot x_{b,i} + \left(\frac{1}{r_y}\right) \cdot y_{b,i},$$

$$\varepsilon_{s,j} = \varepsilon_0 + \left(\frac{1}{r_x}\right) \cdot x_{s,j} + \left(\frac{1}{r_y}\right) \cdot y_{s,j},$$

- *Физические условия* – уравнения связи между напряжениями и деформациями (уравнения состояния) материала

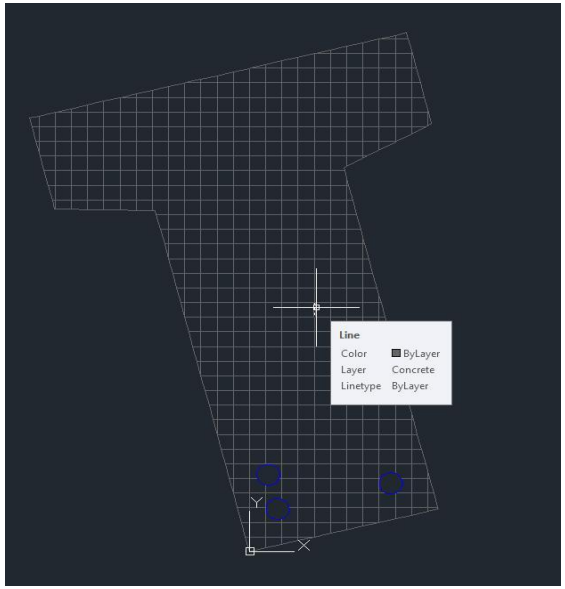
$$\sigma_{b,i} = f_b(\varepsilon_{b,i}) = \varepsilon_{b,i} E_b \nu_{b,i},$$

$$\sigma_{s,j} = f_s(\varepsilon_{s,j}) = \varepsilon_{s,j} E_s \nu_{s,j},$$

Общие соображения

В случае такого физически нелинейного и конструктивно неоднородного материала, как железобетон, задачу удобнее решать с помощью процедуры численного интегрирования напряжений по нормальному сечению.

Для этого нормальное сечение представляют в дискретной форме – в виде набора элементарных участков, в пределах которых все характеристики (напряжения, деформации и др.) принимаются постоянными. Количество и размеры таких участков определяются особенностями напряженно деформированного состояния и другими факторами.



Пример деления сечения на элементарные участки для последующего проведения расчета

Суть расчёта по деформационной модели

Методы решения исходных уравнений деформационной модели

Метод переменных параметров упругости.

Наиболее часто применяемый способ, в котором коэффициенты упругости физически нелинейного материала последовательно уточняются в процессе решения физически нелинейных задач.

Для его реализации составляется разрешающая система уравнений, в которой неизвестными являются обобщенные перемещения. Решение имеет вид:

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_0 \\ 1/r_x \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{Bmatrix} N \\ M_x \end{Bmatrix}.$$

Компоненты матрицы жесткости зависят от коэффициентов секущего модуля бетона и арматуры, которые в свою очередь определяются уровнем деформаций.

Решается методом приближений, задаваясь некоторыми значениями коэффициентов, определяя значения обобщенных деформаций, затем по гипотезе плоских сечений находят силовые деформации каждого компонента сечения, по ним вычисляют коэффициенты секущего модуля, а затем вновь проводят расчет до совпадения соответствующих деформаций двух смежных

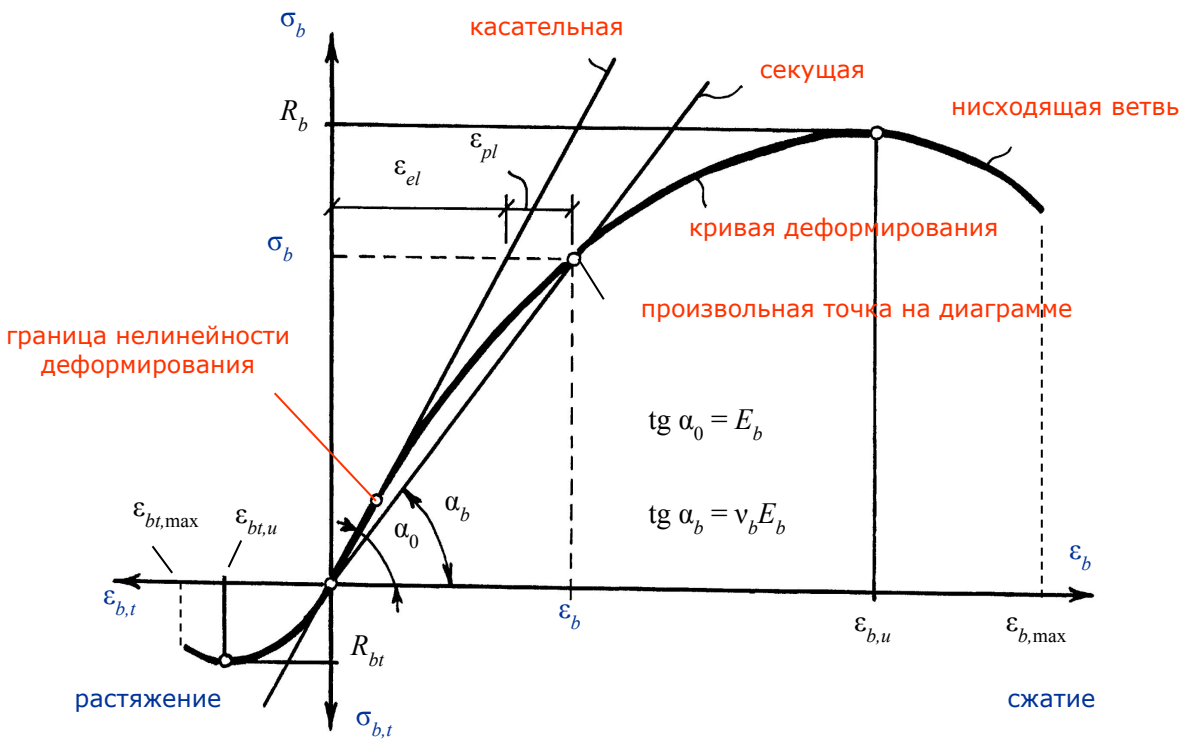
Метод непосредственного подбора.

Для определения несущей способности и анализа состояния сечения в случаях плохой сходимости итерационного процесса более удобным оказывается метод непосредственного подбора параметров деформированного состояния.

Использование метода подбора позволяет выявить нисходящую ветвь на диаграмме «момент-кривизна», поскольку каждому заданному значению кривизны $1/r_x$ соответствует единственное значение момента M_x.

Однако и данный метод имеет свои недостатки, он сложнее алгоритмируется, что является немаловажным моментом при создании программного расчетного комплекса.

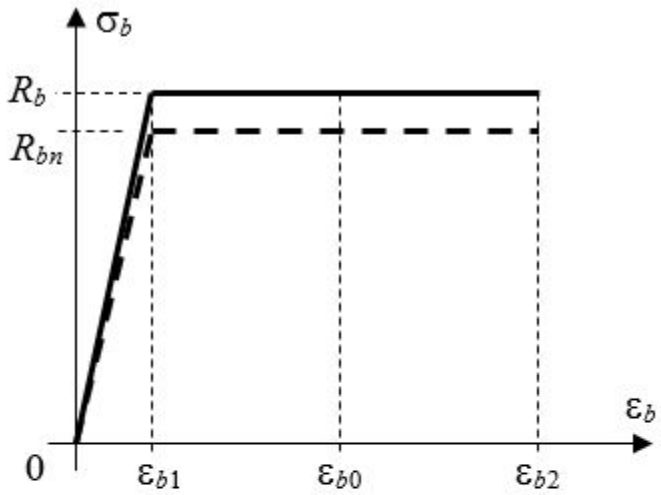
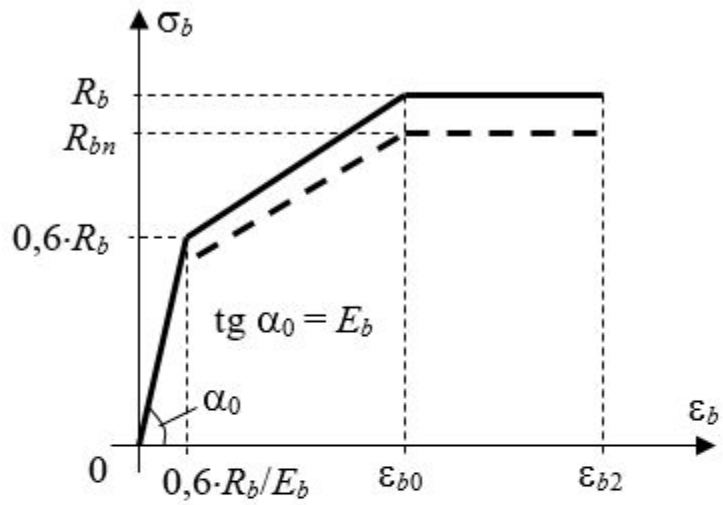
Диаграммы деформирования бетона



Полная диаграмма деформирования бетона

Российскими норами допускается применять любые виды очертания диаграмм деформирования, однако СП 63.133300.2012 рекомендует к использованию двухлинейные и трехлинейные диаграммы по типу диаграмм Прандтля. В свою очередь, для расчета по несущей способности – двухлинейные, а для расчета по трещиностойкости – трехлинейные.

Диаграммы деформирования бетона

<table>
<tr>
<td>Двухлинейная
 
</td>
<td>Трёхлинейная
 
</td>
</tr>
<tr>
<td>Значения деформаций для тяжёлого бетона при непродолжительном действии нагрузки</td>
<td>Сжатие
ε_{b0} = 0,002 (0,2%)
ε_{b1} = 0,0015 (0,15%)
ε_{b2} = 0,0035 (0,35%) – для классов бетона не выше B60
Растяжение
$\varepsilon_{bt,0}$ = 0,0001 (0,01%)
$\varepsilon_{bt,1}$ = 0,00008 (0,008%)
$\varepsilon_{bt,2}$ = 0,00015 (0,015%)</td>
</tr>
</table>

Обзор созданной программы

Созданная мною программа позволяет рассчитывать железобетонные элементы по деформационной модели, как в одной, так и в двух плоскостях.

Алгоритм выполнения расчета сводится к трем основным этапам:

1. Задание геометрии сечения, а также его разбиение на «элементарные» участки в программе Autodesk AutoCAD.
2. Импорт сечения в MS Office Excel, а также ввод таких исходных данных, как характеристики материалов, характер действия нагрузки, тип деформационных диаграмм и т.д.
3. Непосредственно выполнения расчета, а также, при желании, экспорт в Autodesk AutoCAD графического отображения расчетов.

Обзор созданной программы

Примеры окон ввода/вывода данных

Информация о расчете			
Характеристики материалов		Расчетные	
Точность расчета (%, кН (кН×м))		0,10%	0,10
Учитывать сопротивление растяжению бетона		Нет	
Максимальное количество итераций		750	
Учитывать вес материала при определении центра тяжести сечения		Нет	
Информация о бетоне			
Класс тяжелого бетона		B40	
Относительная влажность воздуха окружающей среды, %		40 - 75	
Действие нагрузки		Непродолжительное	
Произведение коэффициентов условий работы γ_{bi} [п. 6.1.12]		0,90	
Произведение коэффициентов условий работы γ_{bti} [п. 6.1.12]		0,90	
Диаграмма состояния бетона		Двухлинейная	
Начальный модуль упругости бетона, E_b, E_{bt}, МПа [табл. 6.11]		3,60E+04	
Модуль деформации бетона, E_{bT}, E_{bTt}, МПа [табл. 6.11]		3,60E+04	
Расчетное сопротивление осевому сжатию R_b, МПа [табл. 6.7, 6.8]		19,8	
Расчетное сопротивление осевому растяжению R_{bt}, МПа [табл. 6.7, 6.8]		1,26	
Сжатие с возможностью учета косвенного армирования [п 6.1.14, Приложение К]	Величина ε_{b1}	0,00033	
	Величина $\varepsilon_{b1,red}$	0,00150	
	Величина ε_{b0}	0,00200	
	Величина ε_{b2}	0,00350	
Растяжение [п 6.1.14]	Величина ε_{bt1}	0,00002	
	Величина $\varepsilon_{bt1,red}$	0,00008	
	Величина ε_{bt0}	0,00010	
	Величина ε_{bt2}	0,00015	
Учет продольного изгиба и случайного эксцентриситета			
Конструкция статически неопределимая		Да	
Расчетная длина элемента [п. 8.1.17]	в плоскости момента M_x, l_{0x}, м	8,00	
	в плоскости момента M_y, l_{0y}, м	8,00	
Случайный эксцентриситет [п. 7.1.7]	в плоскости момента M_x, e_{ax}, см	1,00	
	в плоскости момента M_y, e_{ay}, см	1,00	
Доля длительности нагрузки (отношение моментов внешних сил от действия постоянных и длительных нагрузок к моментам от действия всех нагрузок)		1,00	

Информация об усилиях в сечении элемента

Нагрузки	Заданные	С учетом прогиба, e_a и преднапряжения	Полученные	Разница
Нормальная сила, N, кН	-110,0	-1006,4	-1006,8	-0,05%
Изгибающий момент M_x, кНм	0,0	1,3	1,3	0,03%
Изгибающий момент M_y, кНм	-330,0	-387,0	-389,9	-0,76%

Информация о косвенном армировании		
Учет косвенного армирования		Нет
Класс арматуры сеток косвенного армирования		A400
Расчетное сопротивление арматуры сеток косвенного армирования $R_{s,xy}$, МПа [табл. 6.13, 6.14]		350
Косвенное армирование в направлении X	число стержней n_x	5
	площадь сечения стержня, A_{sx}, см^2	0,785
	длина стержня сетки l_x, см	55,0
Косвенное армирование в направлении Y	число стержней n_y	5
	площадь сечения стержня, A_{sy}, см^2	0,785
	длина стержня сетки l_y, см	55,0
Площадь, заключенная внутри контура сеток косвенного армирования A_{ef}, считая по их крайним стержням, см^2		3600
Шаг сеток косвенного армирования s, см		10
Коэффициент косвенного армирования $\mu_{s,xy}$ [(К.10)]		0,0120
Коэффициент α_{red} [(К.12)]		0,1312
Коэффициент φ [(К.11)]		2,7687

Информация о ненапрягаемой арматуре	
Класс продольной ненапрягаемой арматуры	A600
Произведение коэффициентов условий работы γ_{si}	1,00
Диаграмма состояния арматуры	Трехлинейная (условный предел текучести)
Расчетное сопротивление арматуры растяжению R_s, МПа [табл. 6.13, 6.14]	520
Расчетное сопротивление арматуры сжатию R_{sc}, МПа [табл. 6.13, 6.14]	400
Модуль упругости арматуры, E_s, МПа [п. 6.2.12]	2,00E+05
Величина ε_{s0} [п. 6.2.11]	0,0046
Величина ε_{s2} [п. 6.2.14, п. 6.2.15]	0,015

Информация о напрягаемой арматуре		
Класс продольной напрягаемой арматуры	A600	
Коэффициент, вводимый при расчете на прочность и учитывающий возможные отклонения предварительного напряжения γ_{sp} (растяж/сжатие)	0,9	1,1
Диаграмма состояния арматуры	Трехлинейная (условный предел текучести)	
Предварительное напряжение арматуры с учетом всех потерь σ_{sp}, МПа	346,0	
Расчетное сопротивление арматуры растяжению R_s, МПа [табл. 6.13, 6.14]	520	
Расчетное сопротивление арматуры сжатию R_{sc}, МПа [табл. 6.13, 6.14]	400	
Модуль упругости арматуры, E_s, МПа [п. 6.2.12]	2,00E+05	
Величина ε_{s0} [п. 6.2.11]	0,0046	
Величина ε_{s2} [п. 6.2.14, п. 6.2.15]	0,015	

Обзор созданной программы

Дополнительные элементы управления

Результаты расчета

Визуальные

1 МПа	=	-15
Множитель "столбиков" деформаций		1,0E+05

Численные

Размер текста для бетона и польз. мат.	10,0
Размер текста для арматуры и точек	10,0
Множитель отн. деформаций	1,0,E+04

Получение геометрии и расчет

Получить геометрию из AutoCAD

Выполнить расчет

Отобразить сжатую зону

Отобразить сжатые элементы с отн. деф. больше предельной

Отобразить растянутые элементы с отн.

Отобразить "столбики" напряжений в бетоне

Отобразить "столбики" напряжений в пользовательском материале

Отобразить "столбики" отн. деформаций

Очистить чертеж

Отобразить напряжения в арматуре, МПа

Отобразить напряжения в бетоне, МПа

Отобразить напряжения в пользовательском материале, МПа

Отобразить напряжения в точках, МПа

Отобразить относительные деформации в элементах

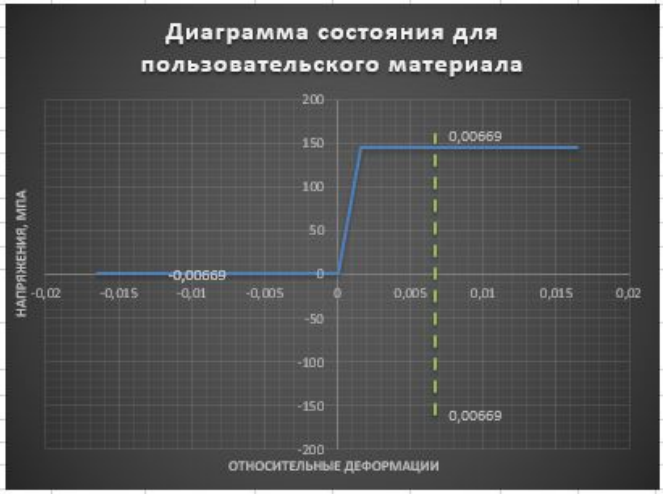
Отобразить относительные деформации в точках

Отобразить усилия в арматуре, кН

Отобразить усилия в пользовательском материале, кН

Обзор созданной программы

Диаграммы состояния материалов



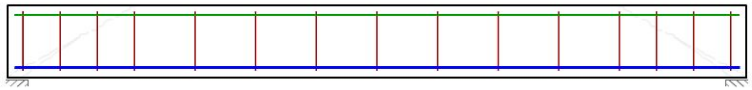
Расчёт железобетонной балки прямоугольного сечения

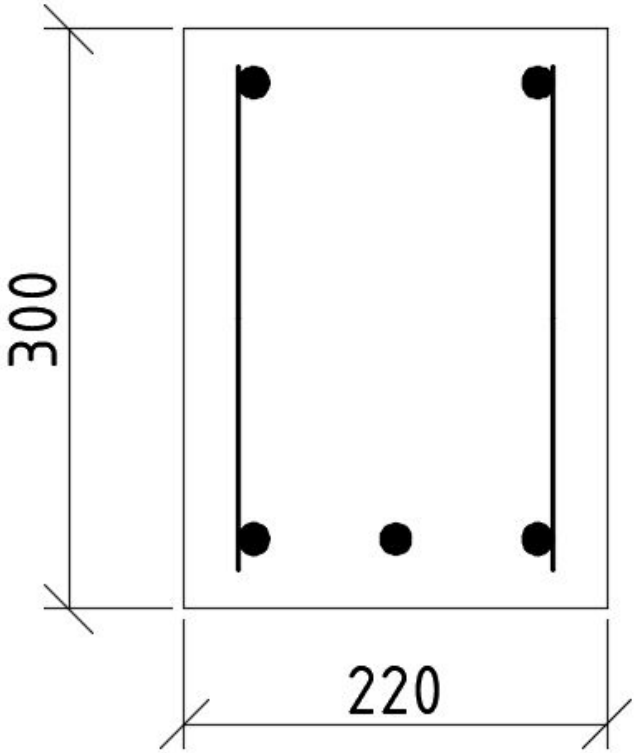
Исходные данные:

-прямоугольная балка 30х22х300

-Класс арматуры А500

-Класс бетона В25.





Наименование расчета	По ручному расчету	По ограничениям из СП 63.13330.2012	+10%	+20%	+50%	Без ограни-чений
По нормальному сечению (кН*м)	35,8	35,87	36,19	36,44	36,59	37,02
На момент трещинообразования (кН*м)	21,5	21,52	21,89	22,08	22,45	22,75

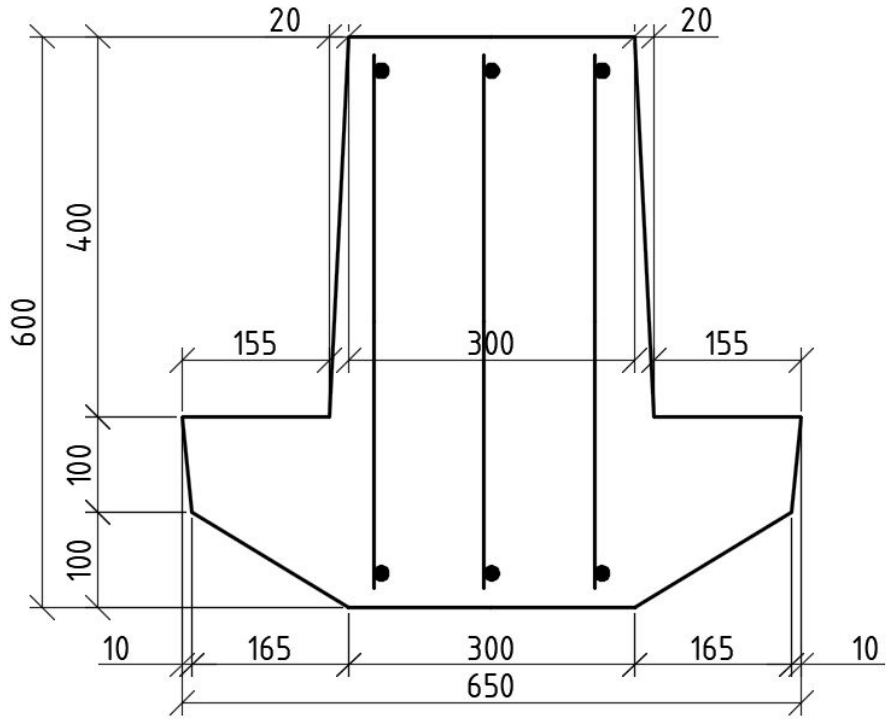
Расчёт железобетонного ригеля таврового сечения

Исходные данные:

-ригель таврового сечения пролет 5,1м.

-Класс арматуры А400

-Класс бетона В20.



№ п/п	Вид нагрузки	Нормативная нагрузка q_n, кН/м^2	γ_f	Расчетная нагрузка q, кН/м^2
I	Постоянная нагрузка			
1	Железобетонные плиты	18,0	1,1	19,8
2	Пол и перегородки	15,0	1,1	16,5
3	Собственный вес ригеля	5,0	1,1	6,6
	Итого	38,0	-	42,9
II	Временная нагрузка			
1	Кратковременная	66,69	1,2	80,03
2	Длительная	35,75	1,2	42,9
	Всего	102,44	-	122,93

Наименование расчета	По ручному расчету	По ограничениям из СП 63.13330.2012	+10%	+20%	+50%	Без ограни-чений
По нормальному сечению (кН*м)	211,32	212,02	215,20	216,47	219,23	220,93
На момент трещинообразования (кН*м)	124,81	124,92	127,54	128,92	131,42	136,04

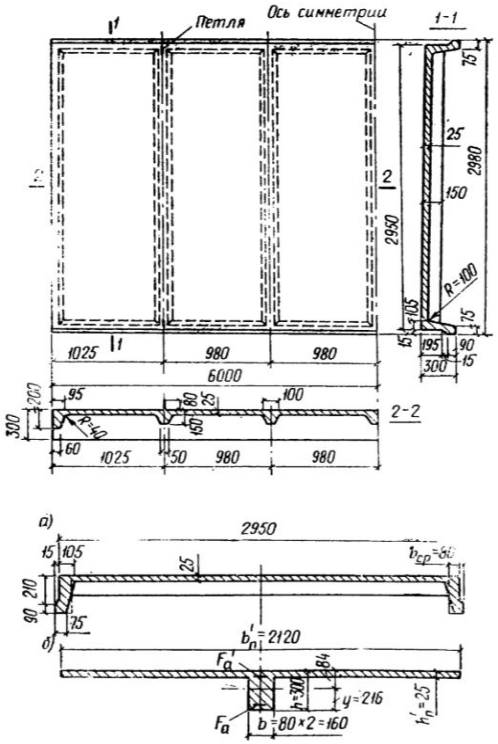
Расчёт железобетонной ребристой плиты

Исходные данные:

-ребристая панель 3х6 м.

-Класс напрягаемой арматуры А800

-Класс бетона В30.



№ п/п	Вид нагрузки	Нормативная нагрузка $q_н$, кН/м^2	γ_f	Расчетная нагрузка q, кН/м^2
I	Постоянная нагрузка			
1	Трехслойный рубероид	0,15	1,2	0,18
2	Цементная стяжка	0,4	1,3	0,52
3	Утеплитель	0,6	1,2	0,72
4	Пароизоляция	0,1	1,2	0,12
5	Ребристые панели	1,35	1,1	1,485
	Итого	2,6	-	3,025
II	Временная нагрузка			
1	Кратковременная	0,3	1,4	0,42
2	Длительная	0,7	1,4	0,98
	Всего	3,6	-	4,425

Наименование расчета	По ручному расчету	По ограничениям из СП 63.13330.2012	+10%	+20%	+50%	Без ограничений
По нормальному сечению (кН*м)	62,04	62,09	62,59	63,27	63,58	63,64
На момент трещинообразования (кН*м)	37,6	37,63	38,31	38,65	38,95	39,44

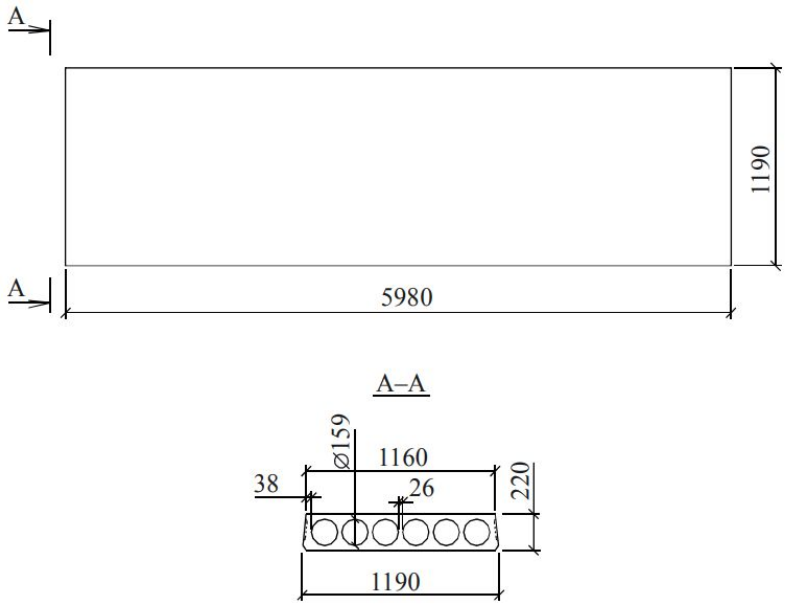
Расчёт железобетонной многопустотной плиты

Исходные данные:

-Размеры плиты 1,2х6 м.

-Класс напрягаемой арматуры А600

-Класс бетона В15.



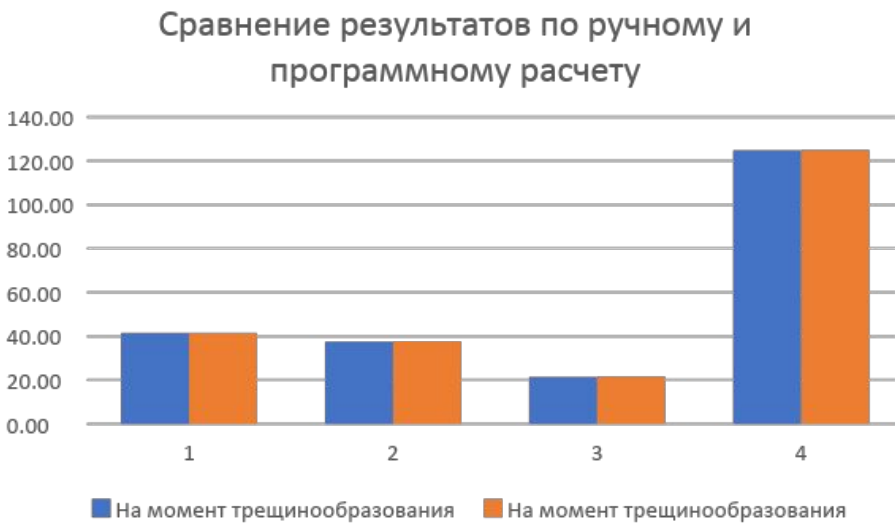
№ п/п	Вид нагрузки	Нормативная нагрузка q_n, кН/м²	γ_f	Нормативная нагрузка q, кН/м²
I	Постоянная нагрузка			
1	Трехслойный рубероид	0,15	-	0,711
2	Цементная стяжка	3	1,1	3,3
	Итого	3,578	-	4,011
II	Временная нагрузка	8	1,2	9,6
1	Кратковременная	2,667	1,2	3,2
2	Длительная	5,333	1,2	6,4
	Всего	11,578	-	13,611

Наименование расчета	По ручному расчету	По ограничениям из СП 63.13330.2012	+10%	+20%	+50%	Без ограни-чений
По нормальному сечению (кН*м)	70,60	70,71	71,49	71,91	72,34	73,18
На момент трещинообразования (кН*м)	41,45	41,43	42,05	42,47	43,08	43,67

Анализ и сравнение результатов

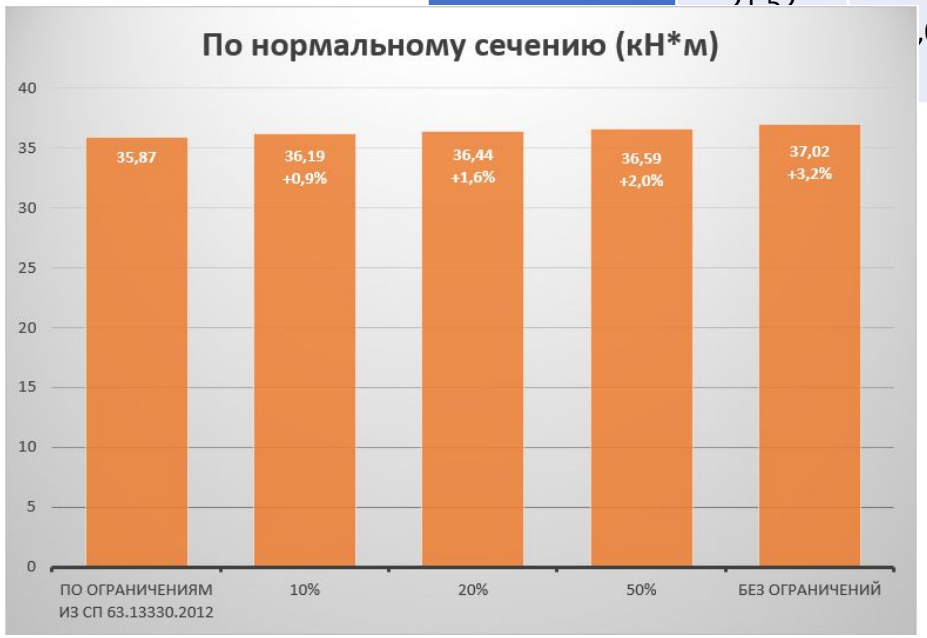
Проведенные расчеты показали, что разница в результатах, полученных при ручном расчете и расчете по деформационной модели с использованием программы по ограничениям диаграмм из СП 63.13330.2012, совершенно не значительна и не составляет более 0,33%.

Номер расчета	По нормальному сечению		На момент трещинообразования	
	ручной расчет	расчет по программе	ручной расчет	расчет по программе
1	70,60	70,71	41,45	41,43
2	62,04	62,09	37,60	37,63
3	35,80	35,87	21,50	21,52
4	211,32	212,02	124,81	124,92



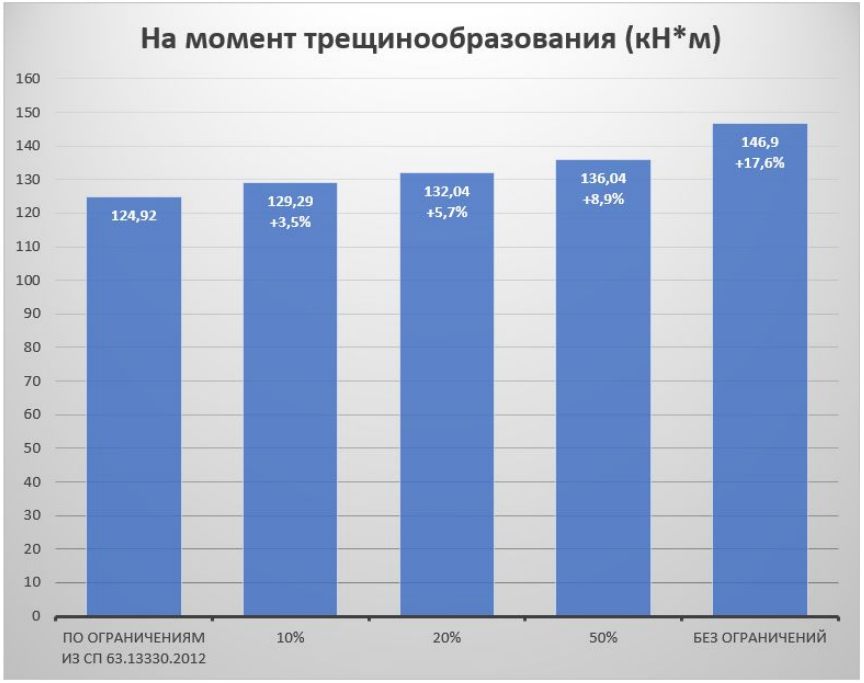
Расчёт железобетонной балки прямоугольного сечения

Наименование расчета	По ограничениям из СП 63.13330.2012	+10%	+20%	+50%	Без ограничений
По нормальному сечению (кН*м)	35,87	36,19 (+0,9%)	36,44 (+1,6%)	36,59 (+2,0%)	37,02 (+3,2%)
На момент трещинообра	21,52	21,95 ,0%)	22,23	23,22	24,98



Расчёт железобетонного ригеля таврового сечения

Наименование расчета	По ограничениям из СП 63.13330.2012	+10%	+20%	+50%	Без ограничений
По нормальному сечению (кН*м)	212,02	215,20 (+1,5%)	216,47 (+2,1%)	219,23 (+3,4%)	220,93 (+4,2%)
На момент трещинообраз	124,92	129,29 5%)	132,04 (+	136,04	146,9

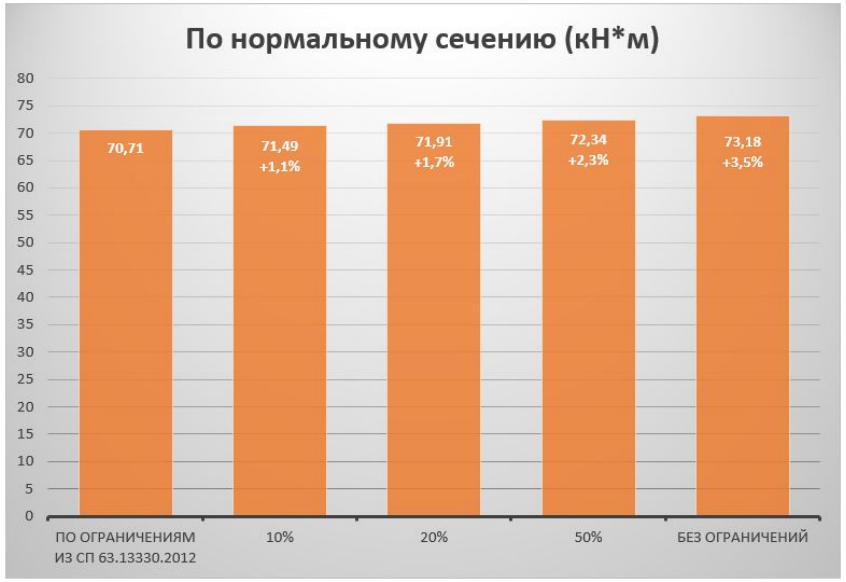


Расчёт железобетонной ребристой плиты

Наименование расчета	По ограничениям из СП 63.13330.2012	+10%	+20%	+50%	Без ограничений
По нормальному сечению (кН*м)	62,09	62,59 (+0,8%)	63,27 (+1,9%)	63,58 (+2,4%)	63,64 (+2,5%)
На момент трещинообра	37,63	38,53	38,98	40,72	44,58

Расчёт железобетонной многопустотной плиты

Наименование расчета	По ограничениям из СП 63.13330.2012	10%	20%	50%	Без ограничений
По нормальному сечению (кН*м)	70,71	71,49	71,91	72,34	73,18
		(+1,1%)	(+1,7%)	(+2,3%)	(+3,5%)
На момент трещинообразования (кН*м)	41,43	42,34	42,96	44,74	47,81
		(+2,2%)	(+3,7%)	(+8,0%)	(+15,4%)



Выводы

Анализ полученных результатов показал, что при расчете по нормальному сечению средняя разница при полном снятии ограничений с диаграммы деформирования составила 3,35%, а максимальная разница достигала 4,2%. При расчете же на момент трещиностойкости средняя разница при полном снятии ограничений с диаграммы деформирования составила 16,2%, а максимальная разница достигала 17,6%.

Исходя из этого, можно сделать вывод, что изменение ограничений границ диаграмм деформирования при расчете железобетонных конструкций влечет за собой получение результатов несущей способности и трещиностойкости, отличающихся от результатов ручного расчета и расчета по ограничениям из СП 63.13330.2012, причем результаты расчета по трещиностокойсти достигают значительных различий.

Доклад окончен.
Спасибо за внимание.